



Research Paper

# ÉTUDE DE LA DÉPOSITION D'AÉROSOLS ENTRAÎNÉS PAR UN ÉCOULEMENT TURBULENT SUR LES PAROIS D'UNE CONDUITE COUDÉE A 90° AVEC L'APPROCHE LAGRANGIEN-RANS

Study of aerosol deposition in 90° bend turbulent flow using Lagrangian RANS approach

**Yacine KAHIL<sup>a\*</sup>, Abdelkrim BENLEFKI<sup>a,b</sup>**<sup>a</sup>*Institut des Sciences et Technologie, Centre Universitaire El-Wancharissi 38000 Tissemsilt, Algérie*<sup>b</sup>*Département de Génie Mécanique, Université des Sciences et la Technologie d'Oran MB, 31000 Oran, Algérie*

## ARTICLE INFO

*Historique de l'article:*

Reçu 25 mai 16

Accepté 25 juin 16

Mots clés:

Déposition d'aérosol ; RANS ; Model Lagrangien ; Ecoulement turbulent

Keywords:

Aerosol deposition; RANS; Lagrangian model; turbulent flow

## RÉSUMÉ

Ce travail présente une étude numérique d'un écoulement turbulent d'un gaz chargé de particules à divers diamètre dans une conduite coudée à 90°. Cette étude peut être un moyen efficace pour la prévision de la dispersion et la déposition des aérosols dans le réseau de transport et de distribution du gaz. La dynamique de l'écoulement est calculée en utilisant la technique statistique des moyennes de Reynolds des équations de Naviers-Stocks (RANS). Pour le calcul, un code open-source nommé Code\_Saturne (Archambeau et al. [1]) est utilisé et le nombre de Reynolds  $Re = 10.000$ . Les résultats de la présente étude employant le model stochastique, permet de classer les particules en trois catégories (petites, intermédiaires, et grandes), et montrent aussi un accord avec les valeurs expérimentales obtenues par Pui et al. [2] et avec les données numériques de Breuer et al. [3], excepté pour les petits nombre de Stokes.

## ABSTRACT

This work presents a numerical study of turbulent flow of a gas loaded with particles with various diameters in a 90° bend. This study can be an effective way to predict the dispersion and deposition of aerosol in transportation and distribution gas networks. The dynamics of flow is calculated using a statistical technique of Reynolds averaged Navier-Stocks equations (RANS). For the computation an open-source code namely Code\_Saturne (Archambeau et al. [1]) is used and the Reynolds number  $Re = 10.000$ . The results of this study using the stochastic model, classifies particles into three categories (small, intermediate and large), and also show a good agreement with experimental values obtained by Pui et al. [2] and with the numerical data of Breuer et al. [3], except for the small Stokes numbers.

## 1 Introduction

Un des problèmes les plus intéressants à étudier dans la dynamique des fluides est la prévision des écoulements turbulents chargés de particules. Ces derniers sont caractérisés par l'interaction complexe entre deux différentes phases. La

\* Corresponding author. Tel.: +213 5 49715013

E-mail address: kahil.yacine@gmail.com

différence entre les phases peut être leur état thermodynamique, appelé la phase (gaz, liquide ou solide) ou leur composition chimique.

De tels écoulements se produisent dans plusieurs applications industrielles. Comme exemples, le domaine du transport du gaz, les turbomachines fonctionnant dans des environnements pollués, filtration, lutte contre la pollution, et la déposition des particules dans les conduites. Dans ces configurations l'écoulement est turbulent, et la turbulence joue un rôle très important dans le transport de masse, quantité de mouvement et d'énergie entre les phases solides et liquides (Pope[4]).

Malgré ces diverses applications, ces écoulements sont mal interprétés. Une meilleure compréhension de ces derniers exige le développement de dispositifs qui permettent de surmonter les problèmes courants et peuvent aider à réaliser un environnement plus sain et plus sûr. Afin d'augmenter notre niveau de connaissances actuelles pour les écoulements diphasiques, des efforts sont nécessaires en modélisant des processus fondamentaux comme la dispersion de particules, mélange, la concentration, les changements de phase (évaporation, condensation, ébullition), la chaleur de l'interphase, la masse et le transfert de quantité de mouvement.

Ce projet décrit la méthodologie efficace et précise pour prévoir les écoulements diphasiques turbulents qui sont de grande importance dans beaucoup techniques. En outre, des études de dépôt inertiel dans des conduites coudées ont été motivées par l'intérêt de calculer le dépôt des particules (Berrouk et al. [5]). Pour l'industrie de pétrole et de gaz, la prédiction du dépôt de particules et les phénomènes d'accompagnement d'érosion est crucial pour éviter la réparation ou remplacement de composants extrêmement chers.

## 2 Modèle numérique

### 2.1 La dynamique de l'écoulement

Dans les conduites coudées de section transversale circulaire, la dynamique turbulente d'écoulement est complexe. En effet, elle est caractérisée par l'existence de régions de recirculation et de lignes de courant courbées. Si l'écoulement dans une conduite coudée est censé représenter l'écoulement dans les gazoducs, le nombre de Reynolds est de l'ordre de quelques milliers. Pour le rapport de courbure ( $R_0 > 5$ ), le champ d'écoulement dans les tubes coudés dépend seulement du nombre de Dean (Mcfarland et al. [6]).

$$De = \frac{Re_d}{\sqrt{R_0}} \quad (1)$$

#### 1.1.1 Equation régissant l'écoulement

Les équations de Navier-Stokes moyennées, appelées équations de Reynolds s'écrivent donc (Viollet et al. [7]) :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_k \partial x_k} - \left( \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (3)$$

Pour le cas étudié, la modélisation statistique RSM est employée avec l'utilisation de la loi de paroi Scalable.

### 2.2 Le transport des particules

Pour le suivi des trajectoires des particules on a utilisé le model Lagrangien employé en conjonction avec le calcul RANS de la partie dynamique, l'utilisation de l'approche stochastique pour prévoir la vitesse du fluide vue par la particule le long de leur trajectoire est basée sur la vitesse moyenne du fluide, l'énergie cinétique turbulente (tensions de Reynolds) et son taux de dissipation.

Nous écrivons la loi fondamentale du transport des différentes particules (Crowe et al. [8]). A partir des hypothèses suivantes :

- Les particules sont considérées comme des sphères rigides dont les centres représentent leurs positions.
- La masse volumique des particules est plus importante que celle du fluide ( $\rho_p / \rho_f \gg 1$ ), les seules forces significatives sont les forces de traînée et de gravité.
- En raison de la basse fraction volumique de la particule ( $10^{-6}$ ), la collision entre particule est négligeable.
- Le transport des particules est considéré comme passif, où la présence des particules n'affecte pas la turbulence du fluide (couplage mono directionnel).

On écrit les équations régissant le mouvement des particules comme suit

$$dx_{p,i} = U_{p,i} dt \quad (4)$$

$$dU_{p,i} = \frac{U_{s,i} - U_{p,i}}{\tau_p} dt + g dt \quad (5)$$

$$\tau_p = C_n \frac{\rho_p}{\rho_f} \frac{4d_p}{3C_D(U_s - U_p)} \quad (6)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{if } Re_p < 1000 \\ 0.44 & \text{if } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (7)$$

Les formulations standard et complète des équations stochastiques de Langevin de Code\_Saturne sont employées pour prévoir la déposition de particules (Douce [9], Berrouk et al. [5]).

\* Formulation Standard :

$$dU_{s,i} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} dt - \frac{U_{s,i} - \langle U_{f,i} \rangle}{T_i} dt + \sqrt{C_0 \langle \varepsilon \rangle} dW_i \quad (8)$$

\* Formulation Complete:

$$dU_{s,i} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} dt + \left( \langle U_{p,j} \rangle - \langle U_{s,j} \rangle \right) \frac{\partial \langle U_{f,i} \rangle}{\partial x_j} dt - \frac{U_{s,i} - \langle U_{s,i} \rangle}{T_i} dt + \sqrt{C_0^* \langle \varepsilon \rangle} dW_i \quad (9)$$

Ces deux formulations sont employées pour construire stochastiquement la vitesse du fluide vue par les particules le long de leur trajectoire. Elles sont résolues simultanément avec les équations de mouvement de particules.

Pour le calcul Lagrangien-RANS des écoulements diphasique, l'approche stochastique est conçue pour reproduire le champ entier de la turbulence éliminé en moyennant les équations de Reynolds. Pour notre cas, ce champ de turbulence est anisotrope. Par conséquent la dépendance directionnelle de l'échelle de temps lagrangienne  $T_L$  doit être prise en considération. Carlier [10] a développé une évaluation directionnelle de l'échelle de temps lagrangienne  $T_L$ . Il identifie la viscosité turbulente  $\nu_t$  avec la diffusivité turbulente menant à une évaluation directionnelle suivante de  $T_L$

$$T_{L,1} = \frac{v_t}{\langle u_1 u_1 \rangle} \quad (10)$$

$$T_{L,2} = \frac{v_t}{\langle u_2 u_2 \rangle} \quad (11)$$

$$T_{L,3} = T_{L,2} \frac{\langle u_3 u_3 \rangle}{\langle u_2 u_2 \rangle} \quad (12)$$

### 3 Etude du Cas

Les prévisions numériques sont comparées aux résultats expérimentaux de Pui et al [2]. Dans son travail expérimental, le dépôt des particules dans des tubes coudés a été mesuré pour un nombre de Reynolds de 10.000 (basé sur le diamètre de la conduite et la vitesse moyenne de l'écoulement).

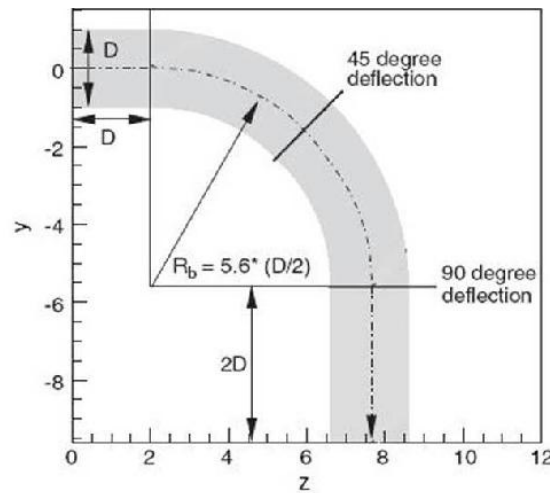


Fig. 1 – Schéma descriptif de la conduite coudée. (Breuer et al. [3])

Les données expérimentales sont récapitulées dans le tableau (Table 1).

**Table 1 - Données du travail expérimentales de Pui et al. [2].**

Diamètre du tube	$D = 0.02 \text{ m}$
Rayon de la courbure du tube	$R_b = 0.056 \text{ m}$
Rapport de courbure	$R_0 = 5.6$
Vitesse moyenne d'admission	$U \approx 10 \text{ m/s}$
Nombre de Reynolds	$Re \approx 10000$
Nombre de Dean	$De = 4.225$
Nombre de Stokes	$0.001 \leq St \leq 1.5$

Le taux de déposition est défini comme la fraction du dépôt de particules dans le coude de la conduite par le nombre total des particules qui pénètre la conduite.

$$\eta = \frac{N_p^{depo}}{N_p^{ent}} \quad (13)$$

Le taux de déposition pour des particules fines dans des tubes coudés dépend des cinq paramètres adimensionnels suivants (Breuer et al. [3])

Nombre de Reynolds du fluide :

$$Re_d = U_m \frac{D}{\nu_t} \quad (14)$$

Nombre de Reynolds des particules :

$$Re_p = U_m \frac{d_p}{\nu_f} \quad (15)$$

Rapport de courbure :

$$R_o = \frac{R_b}{(D/2)} \quad (16)$$

Paramètre d'interception :

$$I_c = \frac{d_p}{D} \quad (17)$$

Nombre de Stokes :

$$S_t = \frac{C \rho_p d_p^2 U_m}{18 \mu_f D/2} \quad (18)$$

Pour éviter l'utilisation des données artificielles à l'entrée qui répondent partiellement aux exigences physiques, les conditions aux limites appropriées pour l'écoulement turbulent dans une conduite coudée est nécessaire. Dans ce but, une simulation séparée avec RANS d'un tube droit avec la même coupe, le même nombre de Reynolds et pas de temps ont été effectués. Des conditions de périodicité ont été employées et la longueur du tube droit est une seule section transversale. A la fin du calcul précurseur, le profil de vitesse d'une section transversale de cette simulation périodique est employé comme état initial à l'entrée du tube monté à l'avant de la conduite coudée. Ceci assure que les conditions à l'entrée sont physiquement correctes.

La section transversale est de 812 cellules (Fig. 3). La grille utilisée ici pour le calcul monophasique (conduite coudée de 90°) contient approximativement 70000 cellules comme représenté sur la figure (Fig. 2). La loi de paroi Scalable est employée en prenant le centre des premières cellules à ( $y^+ \sim 11$ ).

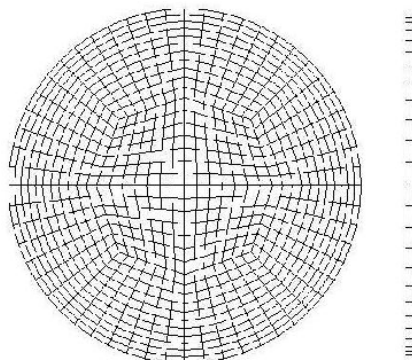


Fig. 2 – Section transversale pour le maillage intermédiaire.

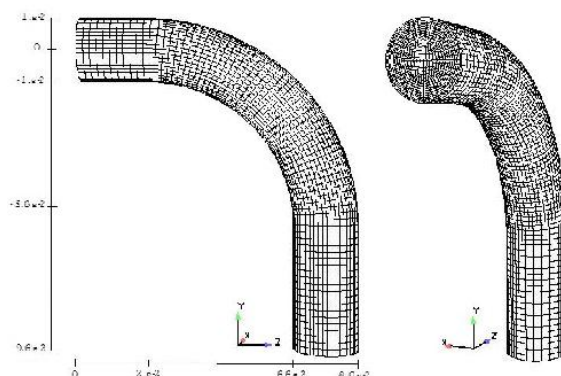


Fig. 3 – Grille de calcul de la conduite coudée de section circulaire.

Pour s'assurer d'avoir des statistiques de particules de haute qualité, le nombre de particule libérée est de grande valeur, 250.000 particules pour chaque diamètre (13 diamètres en tout). Elles sont aléatoirement réparties sur la coupe à l'entre et libéré au premier pas de temps. Elles sont traquées dans tout le domaine jusqu'à ce qu'elles sortent de la conduite ou alors déposent sur les parois. Les caractéristiques physiques des particules dans cette simulation sont récapitulées dans le tableau (Table 2).

**Table 2 - Les caractéristiques physiques des particules traquées pour l'écoulement turbulent de la conduite coudée.**

Nombre de Stokes $St$	Diamètre particule $dp (\mu m)$	Facteur de Cunningham $Cn$	Temps de relaxation $\tau_p (ms)$
0.001	0.68	1.280	0.001
0.05	4.77	1.042	0.05
0.1	6.79	1.024	0.10
0.2	9.64	1.019	0.21
0.27	11.31	1.015	0.29
0.29	11.64	1.015	0.31
0.46	14.70	1.007	0.50
0.75	18.86	1.003	0.81
0.84	19.96	1	0.91
1	21.78	1	1.09
1.22	24.05	1	1.33
1.35	25.30	1	1.47
1.5	26.67	1	1.63

On considère que les particules adhèrent à la surface lors du contact. Numériquement, le contact se produit quand le rayon de particules est inférieur ou égal à la distance normale entre la surface et le centre de particules. Aucun rebondissement de la surface n'est considéré. Bien qu'un grand nombre de particules soient libérées et traquées dans l'écoulement, ni l'accouplement bidirectionnel ni la collision de particules ne sont considérés.

#### 4 Résultats et discussion

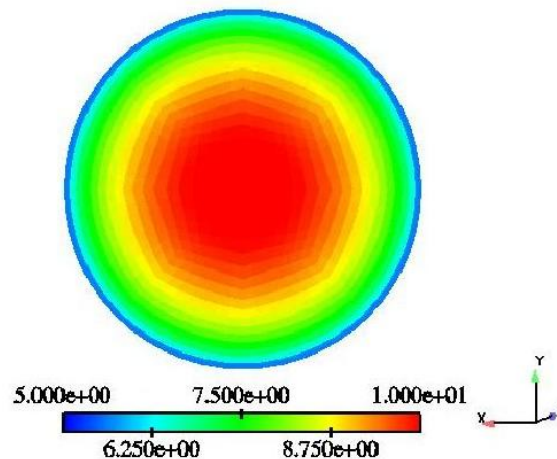


Fig. 4 – Champ de vitesse du calcul précurseur

La figure (Fig. 4) montre le champ de vitesse du tube droit. Il est clair que le profil de vitesse est bien respecté, où l'écoulement sent la présence de la paroi par une vitesse nulle et la vitesse atteint sa valeur maximale au point le plus loin de la paroi qui est le centre de la conduite. Les résultats montrent aussi que l'écoulement est pleinement développé vu que la distribution radiale de la vitesse ne change pas dans la direction axiale. On peut maintenant injecter les données obtenues du calcul tel que la vitesse moyenne, les tensions de Reynolds, et la dissipation à l'admission de la conduite (calcul monophasique).

Pour le calcul monophasique les figures (Fig. 5), (Fig. 6) montrent le champ de pression et de vitesse respectivement, et la figure (Fig. 7) les lignes de courant au plan de symétrie ( $x=0$ ) et près des parois.

Figure (Fig. 8) montre la vitesse axiale moyenne et l'écoulement secondaire pour différentes sections de la conduite ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

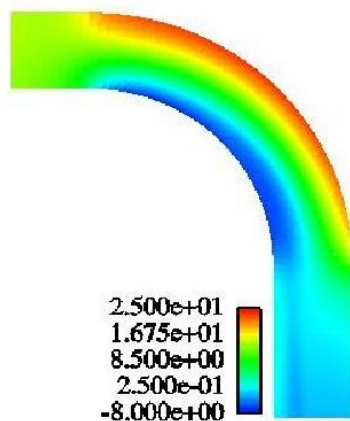


Fig. 5 – Champ de pression de l'écoulement moyen.

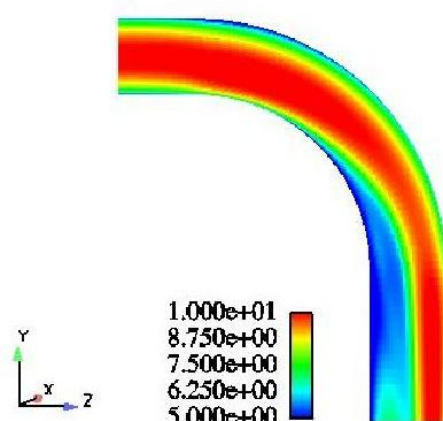


Fig. 6 – Champ de vitesse de l'écoulement moyen.

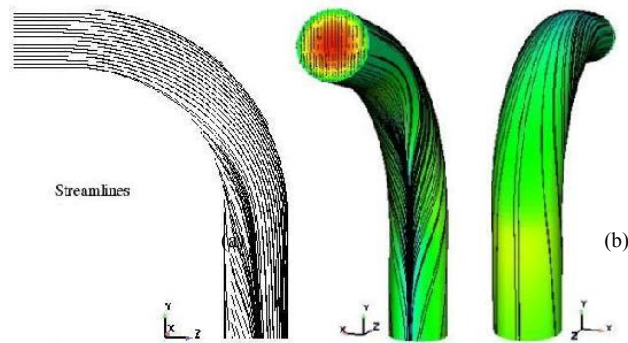


Fig. 7 – Lignes de courant de l'écoulement moyen. (a) Plan central de la conduite (b) Près de la paroi.

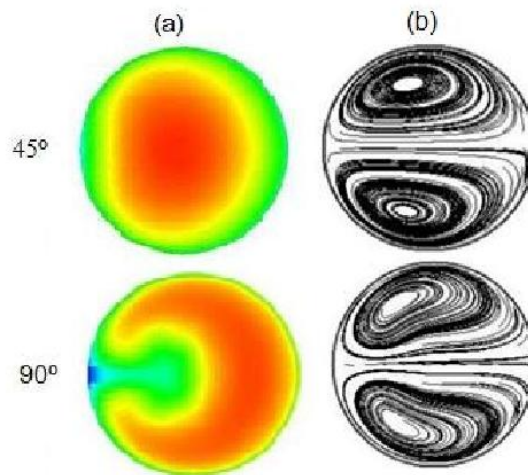


Fig. 8 - (a) Vitesse axiale moyenne (b) Ecoulement secondaire pour différentes sections de la conduite (45°, 90°)

Le dépôt de particules est calculé pour différent nombre de Stokes en utilisant l'équation (13). Le nombre de Stokes des particules s'étend de 0.001 à 1.5 comme c'est montré dans le tableau (Table 2). Pour des particules avec des petits nombres de Stokes ( $St < 0.2$ ), le calcul RANS ne prévoit pas avec efficacité le dépôt qui doit être près de zéro pour les plus petites particules. Pour des particules avec un nombre de Stokes intermédiaire ( $0.2 < St < 1$ ), elles devraient davantage être transporté par la turbulence. Pour la troisième catégorie dans laquelle des particules de nombre de Stokes ( $St > 1$ ), ils ne seront pas influencés par la turbulence dans l'écoulement et leur déposition sera affecté par l'écoulement moyen. Pour ces particules, on s'attend à ce que le RANS prévoit avec efficacité leur dépôt.

La figure (Fig. 9) montre les résultats prévus de RANS pour l'efficacité de la déposition. Ils sont comparés aux mesures expérimentales de Pui et al. [2] et données numériques de Breuer et al. [3]. En outre, Pui et al. [2] décrit l'efficacité de la déposition en fonction du nombre de Stokes par la formule suivante  $\eta_p = 1 - 10^{-0.963St}$ .



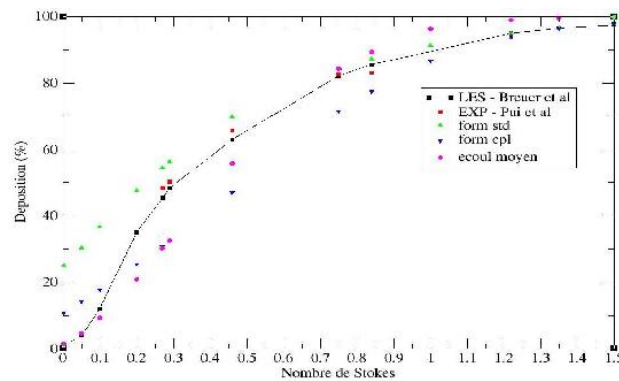


Fig. 9 – L'efficacité de dépôt par rapport au nombre de Stokes.

La figure (Fig. 10), montre les régions de concentration pour le dépôt de particule avec un nombre de Stokes  $St=1$ .

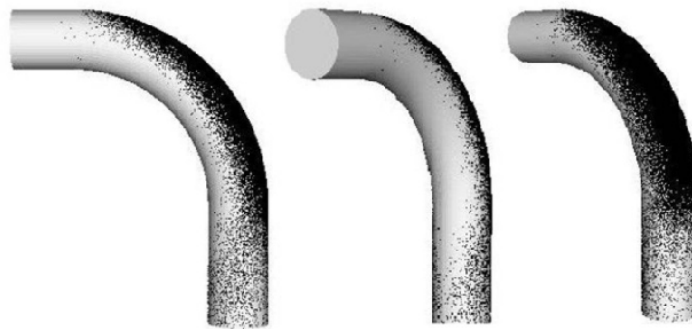


Fig. 10 – Région de concentration du dépôt de particules pour un nombre de Stokes  $St=1$ .

Pour les particules traquées en utilisant seulement l'écoulement moyen produit par RANS ; les résultats montrent qu'une prévision de l'efficacité de la déposition pour les particules de petit nombre de Stokes est meilleure, par contre pour les autres catégories on peut remarquer une sous-estimation de la déposition suivi d'une surestimation jusqu'à atteindre un pourcentage de 100%, et qui est loin des résultats réels. Pour la déposition des particules traquées à l'aide du model lagrangien et qui ont un petit nombre de Stokes, l'utilisation de la formulation complète montre une amélioration en comparaison avec la formulation standard qui semble produire plus de turbulence qu'elle devrait et ceci est justifié par un excédent a estimé l'efficacité de déposition sur presque toute l'intervalle du nombre de Stokes considéré. Malgré ca les résultats restent surestimées et n'expriment pas vraiment le comportement des petites particules qui n'ont pas une force d'inertie grande qui leur permette de pénétrer la sous couche visqueuse et déposer sur les parois. La catégorie intermédiaire montre une meilleure prédiction pour la formulation standard même si elle surestime un peut la déposition des particules, mais pour la formulation complète la déposition est sous-estimé. Finalement pour la troisième catégorie qui regroupe les particules avec grand nombre de Stokes, la déposition est identique aux résultats expérimentaux et cela pour les deux formulations, standard et complète.

## 5 Conclusion

La déposition de particules dans une conduite circulaire coudée à  $90^\circ$  est numériquement étudié en utilisant l'approche Lagrangien-RANS. La dynamique de l'écoulement est calculée à l'aide d'une technique de simulation statistique des équations de Reynolds (RANS). Le transport des particules est modélisé avec l'approche Lagrangien stochastique où des centaines de milliers de particules de différents diamètres sont libérées et traquées dans tout le domaine de calcul. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un code dénommé Code\_Saturne qui est la propriété d'Electricité de France (EDF).

D'après les résultats obtenus par la présente simulation (RANS) qui utilise un model stochastique, on peut conclure que :

- La prédiction de la déposition en utilisant seulement l'écoulement moyen ne donne pas de bons résultats exceptés pour les petites particules.
- L'utilisation du model lagrangien stochastique a généré un niveau de turbulence surestime ce qui explique des taux de déposition trop élevés pour les petites particules.
- Les résultats obtenus soutiennent les travaux théoriques et les observations expérimentales sur la déposition des grandes particules.

Finalement, on peut conclure que l'approche Lagrangien-RANS est insuffisant pour prévoir avec précision la déposition des particules avec petit nombre de Stokes, par contre donne des résultats satisfaisants pour le reste.

## REFERENCES

- [1] F. Archambeau, N. Mechitoua, and M. Sakiz. Code\_Saturne: a Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows. Industrial Applications. Int. J. Finite 1 (2004).
- [2] D. Y. H. Pui, F. Romy-Novas, and B. Y. L. Liu. Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section. Aerosol Sci. 7 (1987) 301-315.
- [3] M. Breuer, H. T. Baytekin, and E. A. Matida. Prediction of aerosol deposition in 90° bends using LES and an efficient Lagrangian tracking method. Aerosol Sci. 37 (2006) 1407-1428.
- [4] S. B. Pope. Turbulent flows. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [5] A. S. Berrouk, A. Douce, D. Laurence, J. J. Riley, and D. E. Stock. RANS and LES of particle dispersion in turbulent pipe flow: simulation versus experimental results. ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM), 2006, 98148.
- [6] A. R. Mcfarland, H. Gong, A. Muyschondt, W. B. Wentz, and N. K. Anand. Aerosol deposition with turbulent flow. Environ. Sci. Technol. 31 (1997) 3371-3377.
- [7] P. L. Viollet, J. P. Chabard, P. Esposito, and D. Laurence. Mécanique des fluides appliquée. Presses des ponts et chaussées, Paris, 1998.
- [8] C. T. Crowe, T. R. Troutt, and J. N. Chung. Numerical Models for Two-Phase Turbulent Flows. Annu. Rev. Fluid. Mech. 28 (1996) 11-43.
- [9] A. Douce. Physiques particulières dans Code\_Saturne 1.1 tome 5 : modélisation stochastique lagrangienne d'écoulements turbulents diphasiques polydispersés. EDF R&D. (2005) HI-81/04/003/A.
- [10] J. P. Carlier, M. Khalij, and B. Oesterle. An Improved Model for Anisotropic Dispersion of Small Particles in Turbulent Shear Flows. Aerosol Sci. 39 (2005) 196-205.